Verfahren und Vorrichtung zur Messung der Ablenkung von Lichtstrahlen durch eine Objektstruktur oder ein Medium

Technisches Anwendungsgebiet und Problemstellung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur ortsaufgelösten Bestimmung der Ablenkung von Lichtstrahlen durch eine Objektstruktur oder ein Medium, bei dem ein Oberflächenbereich eines Objekts oder ein Bereich des Mediums mit wenigstens einem optischen Muster beleuchtet wird und an dem Oberflächenbereich reflektierte oder durch den Oberflächenbereich oder den Bereich des Mediums hindurchgetretene Beleuchtungsstrahlen mit einem ortsauflösenden optischen Detektor erfasst werden.

Das technische Anwendungsgebiet der Erfindung ist die Vermessung spiegelnder Oberflächen. Im Gegensatz zu rauen Oberflächen, die eine Struktur besitzen und Licht i.A. nach allen Richtungen reflektieren, besitzen spiegelnde Oberflächen keine sichtbare Struktur, sie sind unsichtbar. Sie reflektieren einen einfallenden Lichtstrahl nach dem Prinzip „Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel". Ob eine Oberfläche spiegelnd oder rau ist, wird durch das Rayleigh-Kriterium definiert. Um die Form von spiegelnden Oberflächen zu erfassen, sind entsprechend besondere Verfahren erforderlich.

Der Hauptanwendungsbereich der vorgeschlagenen Vorrichtung und des vorgeschlagenen Verfahrens ist die Topographiemessung von Halbleiterscheiben (Wafern). Die normalerweise aus Silizium gefertigten Wafer bekommen durch eine Reihe von Schleif- und Polierprozessen eine spiegelnde Oberfläche und evtl. auch eine spiegelnde Rückseite. Für viele Halbleiterprozesse ist eine enorm gute Ebenheit der Halbleiterscheibe erforderlich. Durch die immer kleiner werdenden Strukturgrößen, steigen die Anforderungen an die Oberflächenqualität bis hin zur Nanotopographie. Entsprechend besteht ein Bedarf an Messgeräten zur Topographiemessung von Halbleiterscheiben. Ziel ist die Prozesskontrolle, Qualitätssicherung und die Charakterisierung von Prozessen.

Verglichen mit anderen Anwendungen, sind an die Vermessung von Halbleiterscheiben besondere Anforderungen gestellt. Wichtigster Punkt sind die äußerst flachen Topographien, die Halbleiterscheiben aufweisen. Um die Nanotopographie von Halbleiterscheiben messen zu können, ist eine enorme vertikale Auflösung bis in den unteren Nanometerbereich erforderlich, während eine, verglichen damit, grobe laterale Auflösung von ca. 100 µm ausreichend ist. Zudem sind große Messfelder, optimaler Weise in der Größe der zu vermessenden Halbleiterscheibe nötig. Der derzeitige Standard-Durchmesser von Halbleiterscheiben liegt bei 300 mm.

Der Anwendungsbereich der vorgeschlagenen Vorrichtung und des vorgeschlagenen Verfahrens ist nicht auf die Vermessung von Halbleiterscheiben beschränkt, sondern

liegt allgemein bei der Vermessung spiegelnder Oberflächen oder der Messung an zumindest teiltransparenten Medien in Transmission.

Stand der Technik

Zur Messung der Topographie von Halbleiterscheiben ist eine Reihe von Messverfahren bekannt und im Einsatz. Die Wichtigsten lassen sich grob in folgende Kategorie unterteilen: vollflächige optische Verfahren, scannende Verfahren, elektrische Sensoren.

Standardmäßig kommen für die Messung Interferometer zum Einsatz. Es wurden z.B. Fizeau-Interferometer mit einem Messfeld von 300 mm realisiert. Auf Grund des großen Messfeldes und den hohen Anforderungen bzgl. Genauigkeit und Stabilität handelt es sich um vergleichsweise aufwändige Verfahren. Außerdem werden Weißlichtinterferometer eingesetzt, die bisher jedoch nicht mit einem Messfeld in der Größe von 300 mm realisiert werden konnten. Es sind daher mehrere benachbarte Einzelmessungen erforderlich, um eine vollständige Vermessung einer Halbleiterscheibe zu erreichen (Stitching).
Neben den vollflächigen Verfahren, bei denen ein größerer Oberflächenbereich mit einer Einzelmessung vermessen wird, gibt es scannende Verfahren und Profilometer (z.B. scannende Deflektometrie, Laserprofilometer). Diese Verfahren tasten die die Oberfläche der Halbleiterscheibe in einem vorgegebenen Raster ab, können die Oberfläche also nicht vollflächig auf einmal erfassen.
Neben optischen Verfahren werden auch elektrische Sensoren, insbesondere kapazitive oder induktive Sensoren eingesetzt. Auch damit ist einer Erfassung der Form von Halbleiterscheiben möglich, jedoch werden derzeit keine so hohen lateralen Auflösungen erzielt wie mit optischen Verfahren.

Neben den bekannten Verfahren zur Vermessung von Halbleiterscheiben sind auch neigungsmessende Verfahren und Verfahren bekannt, die im Allgemeinen die Ablenkung von Lichtstrahlen bei der Transmission durch ein transparentes Medium messen.

So wird bei der sogenannten Schlieren-Methode, die bis auf das 17. Jhd. zurückgeht, die Ablenkung von Lichtstrahlen bei der Transmission durch ein Medium gemessen. Die Ablenkung der Strahlen kommt durch optische Inhomogenitäten des Mediums zustande, z.B. eine Variation des Brechungsindex in Luft durch Temperaturschwankungen. Es wurden damit Strömungen, Temperaturverteilungen, Druckwellen usw. sichtbar gemacht. Bei der Schlieren-Methode wird das Medium von Lichtstrahlen durchleuchtet. Ablenkungen der Strahlen werden je nach Richtung der Ablenkung mehr oder weniger durch ein Knife-Edge, allgemein eine Schlieren Blende geblockt. Die Ebene, in der die Schlieren-Blende angeordnet ist, wird entsprechend Schlieren Cutoff –Ebene oder Schlierenebene genannt. Die interessierende Ebene des Mediums wird auf den Schirm durch eine Linse abgebildet. Je nachdem wie groß die Ablenkungen in jedem Punkt sind, desto heller oder dunkler ist dieser Messpunkt auf

dem Schirm. Der Grad der Ablenkung ist also durch die Intensität kodiert. Das so entstandene Intensitätsbild heißt Schlieren-Bild. Statt Knife-Edges oder Lochblenden können auch Gitter oder linear variable Graufilter oder auch Farbfilter (vgl. Rainbow Schlieren oder Color Schlieren) vor der Lichtquelle und als Schlierenfilter verwendet werden.

Ein Verfahren, das zur Vermessung spiegelnder Oberflächen bekannt ist, ist die Deflektometrie. Bei der Deflektometrie wird eine diffus leuchtende Mattscheibe zur Beleuchtung einer Objektoberfläche eingesetzt. Eine Kamera beobachtet das Spiegelbild der Mattscheibe (= diffus abstrahlendes Licht), das an der zu untersuchenden spiegelnden Oberfläche reflektiert wurde. Vorzugsweise wird die Kamera dabei auf die spiegelnde Oberfläche fokussiert. Diese Ebene wird also scharf abgebildet, die Mattscheibe entsprechend unscharf. Durch Unebenheiten (Topographie) der zu untersuchenden Oberfläche erscheint das Spiegelbild des Mattscheiben-Musters verzerrt. Die Verwendung von Sinus-Intensitätsmustern und einem kombinierten Phasenschiebeverfahren, wie es aus der Interferometrie bekannt ist, ist vorteilhaft (Phasenmessende Deflektometrie).Es handelt sich bei der Deflektometrie um ein Neigungsmessendes Verfahren. Je nach Neigung der Oberfläche an einem bestimmten Punkt sieht der Sichtstrahl, der von der Kamera kommt, eine andere Stelle auf der Mattscheibe, also z.B. einen anderen Intensitätswert. Die lokale Neigung ist also über die Intensität kodiert. Wird ein Phasenschiebeverfahren verwendet, ist nicht die Intensität der primäre Messwert, sondern die Phasenlage des Sinus auf der Mattscheibe. Die Neigungsmessung ist dabei nicht unbedingt eindeutig. Es sind entsprechend aufwändige Kalibrierungsschritte notwendig. Um eine Eindeutigkeit herzustellen werden z.B. auch zwei oder mehrere Kameras aus verschiedenen Blickrichtungen verwendet (Stereodeflektometrie). Die Deflektometrie wird heutzutage zur Neigungsmessung von spiegelnden Oberflächen verwendet z.B. Spiegeln, Autokarosserien, polierte oder verchromte Werkstücke, Linsen, Brillengläser.

Beschreibung der Erfindung

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Messung bzw. Bestimmung der Ablenkung von Lichtstrahlen bei Reflexion an einer Objektstruktur oder bei Durchgang durch ein Objekt oder ein Medium anzugeben, die sich einfach und kostengünstig realisieren lassen und eine möglichst großflächige quantitative Bestimmung der Ablenkung ermöglichen.

Die Aufgabe wird mit dem Verfahren und der Vorrichtung nach Anspruch 1 und 6 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen des Verfahrens und der Vorrichtung sind Gegenstand der abhängigen Patentansprüche oder lassen sich der nachfolgenden Beschreibung sowie den Ausführungsbeispielen und Zeichnungen entnehmen.

Mit dem Verfahren und der Vorrichtung kann in einfacher Weise eine vollflächige quantitative Messung der Ablenkung von Lichtstrahlen ortsaufgelöst durchgeführt

werden, die z.B. bei Reflexion an einer spiegelnden Oberfläche auf Grund von Unebenheiten der Oberfläche (Topographie H(x,y)) oder bei Transmission durch ein Medium auf Grund von Inhomogenitäten des Mediums (z.B. Variation des Brechungsindex auf Grund von Temperaturschwankungen) entstehen. Grundlage ist ein Schlieren-optisches System, wobei zusätzlich eine strukturierte Beleuchtung (Muster) erzeugt durch einen Mustergenerator eingekoppelt wird und in eine Ebene in einem Abstand zur Ebene des Prüflings projiziert wird. Die quantitative Neigungsmessung $\begin{pmatrix}\partial_x H(x,y)\\ \partial_y H(x,y)\end{pmatrix}$ wird dann durch deflektometrische Messung bzw. je nach Wahl der Größe von Beleuchtungs- und Abbildungsapertur durch eine Kombination aus deflektometrischem Prinzip und Schlieren-Methode ermöglicht.

Das Verfahren und die Vorrichtung sind dabei so ausgebildet, dass ein makroskopischer Bereich der Oberfläche oder des Mediums mit einer Einzelmessung erfasst werden kann, vorzugsweise ein Bereich von $\geq 1\text{cm}^2$. Je kleiner die numerische Apertur der Abbildung ist, desto höher ist die erreichte Genauigkeit der Ablenkungsmessung. Um eine hohe Genauigkeit zu erreichen, wird die Beleuchtungsapertur also möglichst klein gewählt, vorzugsweise $\leq 0{,}03$. Die numerische Apertur der Abbildung wiederum ist indirekt proportional zur erreichten lateralen Auflösung, die entsprechend eine untere Grenze für die Wahl der Apertur definiert. Bei derart kleinen numerischen Aperturen ist die Schärfentiefe der Abbildung viel größer als die Schwankung der zu vermessenden Oberfläche.

Vorzugsweise werden bei der Messung Sinus-Intensitätsmuster zusammen mit einem Phasenschiebeverfahren verwendet, das aus der Interferometrie oder der phasenmessenden Deflektometrie bekannt ist. In einem sekundären Schritt kann die Topographie (Höhe, bei Untersuchung einer spiegelnden Oberfläche) bzw. der Brechungsindex (bei Messung eines Mediums in Transmission) *H(x,y)* durch bekannte Integrationsverfahren ermittelt werden. Selbstverständlich sind auch andere Arten von Mustern ohne Einsatz eines Phasenschiebeverfahrens möglich.

Des Weiteren ist es mit dem vorgestellten Aufbau möglich, das Laplacebild (2. räumliche Ableitung der Höhe bzw. Brechungsindex $(\partial_x^2 H(x,y) + \partial_y^2 H(x,y))$, in Transmission bekannt als Shadowgramm, in Reflexion bekannt als Makyoh-Bild), sowie eine semi-quantitative Neigungskarte bzw. Ablenkungskarte $(|\partial_x H(x,y)| + |\partial_y H(x,y)|)$, bekannt als Schlieren-Bild) zu erhalten. Diese Bilder eignen sich zur Echtzeit Analyse, da hierfür keine Bildrekonstruktion (Rechenarbeit) nötig ist. Da es sich um höhere Ableitungen der Höhe bzw. des Brechungsindex handelt sind diese Bilder prädestiniert zur Defekterkennung. Sie können im Vorfeld der quantitativen Messprozedur verwendet werden.

Beispielhafte Ausgestaltungen der vorgeschlagenen Vorrichtung sowie des Verfahrens werden im Folgenden anhand der Figuren 1 bis 4 näher erläutert.

Fig. 3 zeigt einen beispielhaften schematischen Aufbau der Vorrichtung zur Messung in Reflexion, also einer spiegelnden Oberfläche. Fig. 1 zeigt dasselbe Verfahren in

einer Ausgestaltung zur Messung eines Mediums in Transmission und eignet sich zwecks Übersichtlichkeit zur Veranschaulichung der Strahlengänge besser. Die Beleuchtungseinheit 15 besteht aus einem Mustergenerator 3, der ein beliebiges Muster erzeugen kann. Es kann sich dabei um einen Filter, ein Gitter oder einen elektronisch ansteuerbaren Lichtmodulator handeln. Dieser kann selbstleuchtend sein, wie z.B. ein OLED Display oder das Licht in Transmission modulieren wie z.B. ein LCD oder das Licht in Reflexion modulieren, z.B. ein LCOS oder DMD. Wenn der Mustergenerator nicht selbstleuchtend ist, wird eine Lichtquelle 1 und evtl. eine Kondensorlinse 2 benötigt. Die Linse 4 ist Teil der Projektionsoptik, die das Muster abbildet und erzeugt außerdem eine Abbildung der Lichtquelle 1 (an der Stelle 5). An dieser Stelle kann eine Blende 5 angebracht werden, die die Möglichkeit bringt, die Apertur der Beleuchtung zu variieren (z.B. Erzeugung einer kleinen Apertur durch Wahl einer kleineren Lochblende (Pinhole)). Vorzugsweise ist die Blende als variable (verstellbare) Irisblende ausgestaltet. Die Linse 6 ist Teil der Projektionsoptik, die die Ebene des Mustergenerators in einen Abstand vor oder hinter dem zu untersuchenden Medium 8 projiziert. Das Muster ist also an der Stelle 7 scharf. 16 veranschaulicht den Beleuchtungsstrahlengang, gezeigt ist ein Beleuchtungsstrahl (Strahlenbündel), der die Abbildung eines Punktes (des zentralen) des Mustergenerators 3 zeigt. Der Rest der Optik ist Teil des Abbildungssystems. Bei der Ausgestaltung in Reflexion ist die Linse 6 gleichzeitig Teil des Beleuchtungs- und Abbildungssystems, es ist entsprechend keine zweite Linse 9 erforderlich. Es ist außerdem vorteilhaft den Aufbau in Reflexion so zu wählen, dass die Beleuchtung seitlich mit Hilfe eines Strahlteilers 14 eingekoppelt wird. Das Abbildungssystem, bestehend aus den Linsen 9 bzw. 6 und 11 und der Abbildungsblende 10, bildet die Ebene des zu untersuchenden Mediums bzw. der Oberfläche 8 auf die optische Detektoreinheit 12, z.B. ein CCD oder CMOS Sensor ab. Die Kamera ist also auf die zu untersuchende Ebene 8 fokussiert. D.h., dass das projizierte Muster 7 zwangsläufig unscharf auf der Detektoreinheit 12 erscheint. 17 veranschaulicht den Abbildungsstrahlengang, gezeigt ist ein Lichtstrahlstrahl (Strahlenbündel), der die Abbildung eines Punktes (des zentralen) der Ebene 8 auf den Detektor 12 zeigt. In der Ebene 10 ergibt sich wie in der Ebene 5 eine Abbildung der Lichtquelle 1. In dieser Ebene (Schlieren-Cutoff Ebene) kann eine Blende (Schlierenblende) oder allgemein ein Filter angebracht sein, womit die Größe der Abbildungsapertur bestimmt wird und verändert werden kann. Vorzugsweise ist die Blende als variable (verstellbare) Irisblende ausgestaltet. (Falls der Mustergenerator 3 selbstleuchtend ist und deswegen keine Lichtquelle 1 vorhanden ist, kann die Ebenen 5 und 10 als Abbild einer virtuellen Lichtquelle angesehen werden.)

Mit dem vorgestellten Aufbau kann ein klassisches Schlieren-Bild aufgenommen werden. Dazu wird der Mustergenerator 3 entfernt oder so geschalten, dass er keine Beleuchtungsstrukturierung aufweist. Es ergibt sich dann im Wesentlichen ein Aufbau nach der Toepler Schlieren-Methode, wobei Ebene 5 die Ausdehnung der Beleuchtung definiert und 10 die Schlieren-Cutoff Ebene ist. Entsprechend können in diesen Ebenen, je nach Ausgestaltungen der verschiedenen Schlieren-Methoden

diverse Filter, Gitter oder auch elektronisch ansteuerbare Lichtmodulatoren eingesetzt werden.

Mit dem vorgestellten Aufbau kann außerdem ein Makyoh-Bild aufgenommen werden. Makyoh ist nur im Zusammenhang mit spiegelnden Oberflächen bekannt. In Transmission ist dieses Bild als Shadowgramm bekannt.
In Fig. 4 ist eine entsprechende Ausgestaltung (in Transmission) gezeigt. Es sind folgende Unterschiede zum Aufbau in Fig. 1 vorhanden. Für die ursprüngliche Makyoh Methode und auch für die Shadowgraphie wird keine Beleuchtungs-strukturierung benötigt, sodass der Mustergenerator 3 nicht vorhanden ist bzw. keine Lichtmodulation generiert. Wichtigster Unterschied ist die fehlende Blende 10, sie kann wahlweise auch hinreichend groß gewählt sein. Ebenfalls wichtig ist, dass die Detektoreinheit bei diesen Methoden nicht auf die zu untersuchende Ebene fokussiert (also scharf gestellt) wird, sondern in einen Abstand von der zu untersuchenden Ebene. Vorzugsweise ist die Detektoreinheit deshalb in Richtung der optischen Achse verschiebbar angeordnet. Man kann auch an der Stelle 11 ein Kameraobjektiv verwenden, dass eine Fokusverstellung ermöglicht. Zudem wird in den ursprünglichen Ausgestaltungen der beiden Methoden eine Punktlichtquelle und entsprechend eine kollimierte Beleuchtung der zu untersuchenden Probe verwendet. Deswegen ist es Vorteilhaft die Blende 5 hinreichend klein zu wählen. Es gibt außerdem Ausgestaltungen sowohl der Shadowgraphie als auch der Makyoh Methode, bei denen strukturierte Beleuchtung verwendet wird. Auch diese Methoden sind mit dem vorgeschlagenen Aufbau ohne aufwändige Anpassungen realisierbar, da der Mustergenerator (3) beliebige Muster generieren kann.

Die Aufnahme eines Schlieren- und Makyoh-Bildes wie oben beschrieben ist im Wesentlichen Stand der Technik. Neu ist, dass mit dem vorgestellten Aufbau beide Verfahren genutzt werden können, ohne dabei große Umbauten am Aufbau vornehmen zu müssen. Letztendlich müssen nur Blendengrößen verändert werden, Fokusebenen verstellt werden z.B. durch Drehen an einem Kameraobjektiv und evtl. ein anderes Muster auf dem Mustergenerator generiert werden. Die Schlieren-, Makoyh- und Shadowgram-Aufnahmen in der oben genannten Ausgestaltung sind nur qualitativ oder semi-quantitativ.

Das Wesentliche und Neue der vorliegenden Erfindung ist die quantitative Ablenkungs- bzw. Neigungsmessung. Das Prinzip ist in Fig. 2 veranschaulicht. Es wird von einem Aufbau in Transmission (wie in Fig. 1) ausgegangen. Alle Überlegungen sind aber auf einen Aufbau in Reflexion (wie z.B. in Fig. 3) analog übertragbar. Es geht um die Messung der Ablenkung von Lichtstrahlen, die bei einem Medium, das von Licht durchleuchtet wird, durch eine Variation des Brechungsindex des Mediums zustande kommen. Das kann z.B. durch eine Variation der Temperatur bedingt sein, die man messen will. In Reflexion bei der Messung einer spiegelnden Oberfläche kommen Ablenkungen der Lichtstrahlen durch eine Neigung der Oberfläche, also letztendlich der Topographie, zustande. Diese will man messen. Die Ablenkung bzw. Neigung ist ein Vektor mit einer Komponente in x- und

y-Richtung. Die Ablenkung bei Transmission ist der Gradient des Brechungsindex, in Reflexion ist die gemessene Neigung der Oberfläche der Gradient der Höhe, also der Topographie. Aus dem ermittelten Gradienten kann mittels bekannter Integrationsalgorithmen dann in einem sekundären Schritt der Brechungsindex bzw. die Höhe ermittelt werden.

In Fig. 2 a) ist eine Konfiguration gezeigt, bei der die Abbildungsapertur - bestimmt durch die Größe der Blende 10 - kleiner ist als die Apertur der Beleuchtung. Es hat sich als vorteilhaft erwiesen Phasenschiebeverfahren, wie sie z.B. in der Interferometrie oder der phasenmessenden Deflektometrie verwendet werden, einzusetzen. Es wird also vorzugsweise ein Sinus-Intensitätsmuster in die Ebene 7 projiziert. Statt die Intensität des Musters als primäre Messgröße heranzuziehen, wird eine Reihe von Sinus-Mustern hintereinander projiziert, wobei der Sinus jeweils um einen definierten Bruchteil seiner Periode verschoben ist. Schließlich wird die Phasenlage jedes Punktes des Musters eindeutig bestimmt. Es sind mindestens drei Aufnahmen mit phasenverschobenem Sinus erforderlich, um eine eindeutige Phasenbestimmung machen zu können. Da das Sinusmuster periodisch ist, ist die Eindeutigkeit der Phase nur innerhalb der Periode gegeben. Es werden bekannte Phasen-Unwrapping Algorithmen oder andere Methoden (z.B. mehrere Sinusmuster in unterschiedlichen räumlichen Frequenzen) verwendet, um jedem Punkt des Musters eine eindeutige Phase zuzuweisen und somit eine eindeutige Identifizierung zu ermöglichen. Das ist in Fig. 2 durch die Nummerierung (1 - 6) des Musters 7 angezeigt. Es handelt sich um Phasenwerte, die voneinander unterschieden werden können.

In Fig. 2a) oben ist der Abbildungsstrahlengang für einen Messpunkt auf der Ebene des zu untersuchenden Mediums 8 gezeigt, dass in diesem Punkt keine Ablenkung des Lichtstrahls (bzw. Strahlenbündels) induziert z.B. ein homogenes Medium. Auf Grund der kleineren Apertur der Abbildung wird ein Teil des Lichtstrahls durch die Blende 10 geblockt. Es kommen nur die Strahlen mit den Phasenwerten 3 und 4 hindurch, sodass auf der Detektoreinheit 12 ein Phasenwert von 3,5 an dieser Position gemessen wird. (Es kann mathematisch gezeigt werden, dass sich bei einer Superposition von mehreren Sinuswellen mit gleicher Amplitude aber unterschiedlicher Phase, eine Sinuswelle ergibt, deren Phase der Mittelwert aus den einzelnen Phasen ist.)

In Fig. 2a) unten ist der Strahlengang für den Fall gezeigt, dass das Medium eine Ablenkung des Lichtstrahls um den Winkel α induziert. Durch die Ablenkung des Strahlenbündels wird an der Blende 10 ein anderer Teil des Strahlenbündels geblockt, sodass in diesem Fall nur die Strahlen mit den Phasenwerten 2 und 3 passieren können. Entsprechend wird auf dem Detektor 12 ein Phasenwert von 2,5 gemessen. Die Ablenkung um einen Winkel α hat also eine messbare Phasendifferenz von 1 ergeben. Kennt man durch Kalibrierung die Parameter des Aufbaus, insbesondere die Mustergeometrie und den Abstand der Musters von der zu untersuchenden Ebene, kann der Winkel α direkt aus der gemessenen Phase trigonometrisch berechnet werden. Man hat entsprechend die Ablenkungen der Lichtstrahlen an jedem Punkt in der Richtung in der das Sinusmuster verläuft

gemessen. Die zweite Komponente des Gradienten erhält man durch Wiederholung der Prozedur, wobei das Sinusmuster 90° gedreht wird.
Eine Intensitätsänderung ergibt sich in diesem Fall nicht, da sowohl mit als auch ohne Ablenkung die gleiche Lichtmenge auf den Detektor fällt. Vom Prinzip ist die Signalgebung in dieser Konfiguration ähnlich wie bei der Phasenmessenden Deflektometrie.

In Fig. 2b) ist eine Konfiguration gezeigt, bei der die Apertur der Beleuchtung und die der Abbildung gleich groß gewählt wurden. Eine Strahlablenkung um einen Winkel α (unten) ergibt in diesem Fall eine Phasendifferenz von 0,5 zum nicht-abgelenkten Fall (oben). Die Phasenänderung ist also nur halb so groß wie in der vorherigen Konfiguration, sodass man mit einer geringeren Sensitivität der Ablenkungsmessung rechnen muss. Ein weiterer interessanter Aspekt in dieser Konfiguration ist die Tatsache, dass sich eine Intensitätsänderung in Abhängigkeit des Winkels α ergibt. Je größer α, desto weniger Licht fällt auf den Detektor, da mehr von der Blende 10 geblockt wird. Die Neigung ist also zusätzlich über die Intensität kodiert. Projiziert man ein homogenes Muster an die Stelle 7, erhält man mit dieser Konfiguration das semi-quantitative Schlierenbild.
Die Signalgebung in dieser Konfiguration ist vom Prinzip also eine Kombination aus der Phasenmessenden Deflektometrie und der Schlieren Methode.

Bei der vorgeschlagenen Vorrichtung handelt es sich somit um ein schlieren-optisches System in Transmission oder Reflexion, bestehend aus einer Beleuchtungseinheit mit einer Apertur, einer (Schlieren- / Projektions-) Linse- oder Linsenanordnung, einer Schlierenblende oder eines Schlierenfilters, in dessen Ebene die Lichtquelle abgebildet wird, und einer optischen Detektoreinheit, auf die die zu untersuchende Objektebene oder Ebene des Mediums abgebildet wird. Durch einen Mustergenerator kann ein Muster erzeugt werden das durch die (Schlieren- / Projektions-) Linse oder Linsenanordnung in eine Ebene in einem Abstand zur zu untersuchenden Objektebene oder Ebene des Mediums projiziert wird, wodurch eine quantitative Bestimmung/Berechnung der Oberflächenneigung (Gradient der Oberfläche) bzw. der Ablenkung der Lichtstrahlen (Gradient des Brechungsindex) durch deflektometrische Messung möglich ist.

Mit dem vorgeschlagenen Verfahren und der vorgeschlagenen Vorrichtung lassen sich Halbleiterscheiben, z.B. geschliffene oder polierte Wafer, CMP-Wafer, evtl. prozessierte Wafer, vermessen. Einsatzbereich ist hierbei insbesondere die Nanotopographiemessung. Generell ist das Verfahren zur Vermessung von spiegelnden Oberflächen im Allgemeinen geeignet z.B. Spiegel, Linsen, Planoptiken oder polierte Metalloberflächen. Statt der Messung einer Oberfläche in Reflexion, kann ebenso ein Medium in Transmission gemessen werden z.B. Inhomogenitäten in einem transparenten Medium oder Temperaturverteilungen in Luft.

Das vorgeschlagene Verfahren sowie die zugehörige Vorrichtung weisen die folgenden Vorteile auf. Durch die Beleuchtungsoptik ist die Möglichkeit vorhanden, die numerische Apertur der Beleuchtung zu variieren, bis hin zu einer näherungsweise kollimierten Beleuchtung, die die Aufnahme eines Shadowgramms bzw. Makyoh Bildes ermöglicht. Durch die Kontrolle der Beleuchtungsapertur kann ein optischer Tiefpassfilter erzeugt werden, der z.B. Aberrationen der Beleuchtung beseitigt oder Quantisierungseffekte des Mustergenerators (durch eine endliche räumliche Auflösung eines Mikrodisplays) verringert. Ein digitales Muster kann also z.B. näherungsweise analog gemacht werden bzw. geglättet werden. Dadurch ergibt sich eine höhere Genauigkeit der Neigungsmessung. Durch die gerichtete Musterprojektion erhält man eine Eindeutigkeit (Lösung des Mehrdeutigkeitsproblems von Höhe und Neigung der Deflektometrie), so dass im Allgemeinen ein geringerer Kalibrieraufwand nötig ist. Durch die große Zahl an Parametern, die man variieren kann (Beleuchtungsapertur, Abbildungsapertur, Muster, Abstand Muster zu Probe) hat man generell ein großes Spektrum zur Festlegung der Messperformance (Größe des dynamischen Messbereichs, laterale Auflösung, Winkelauflösung, Speckleunterdrückung). Je nachdem, was für die jeweilige Anwendung Priorität hat, kann die Performance optimal gewählt werden. Insbesondere zur Messung von Halbleiterscheiben hat man sehr spezielle Anforderungen verglichen mit anderen Anwendungen (großes Sichtfeld nötig, höchstmögliche vertikale Auflösung (unterer Nanometerbereich), dafür grobe laterale Auflösung (~ 100 µm) ausreichend, geringer dynamischer Messbereich erforderlich, da „ebene" Probe). Das entwickelte Verfahren ist ideal geeignet, um für die Messung von Halbleiterscheiben optimiert zu werden.

Mit geringen Veränderungen hat man die Möglichkeit zwei qualitative bzw. semiquantitative Bilder zur erzeugen, von denen das eine (Schlierenbild) sensitiv auf die Neigung der Oberfläche bzw. Änderung des Brechungsindex bei Transmission ist und das andere (Shadowgramm bzw. Makyoh-Bild) sensitiv auf die Krümmung bzw. 2. Räumliche Ableitung (Laplacebild) ist. Diese Bilder stehen in Echtzeit ohne Rekonstruktion oder Berechnung zur Verfügung und eignen sich optimal für eine Defekterkennung und im Vorfeld der quantitativen Prozedur. Bei Verfahren wie der Deflektometrie oder der Interferometrie oder scannenden Verfahren hat man keine Möglichkeit, vor der Messung auf einfache Weise derartige Informationen zu bekommen.

Gegenüber bekannten Verfahren für die hochgenaue Topographiemessung von Halbleiterscheiben, insbesondere Interferometer, weist die vorgeschlagene Vorrichtung einen einfacheren Aufbau auf und lässt sich kostengünstiger realisieren. Weiterhin besteht die Möglichkeit zur Realisierung eines großen Messfeldes, das z.B. ausreichend ist, um 300 mm Halbleiterscheiben mit nur einer Aufnahme zu vermessen. Der Aufbau ist flexibel, sodass er als integrierte Messtechnik genutzt werden kann. Die Vorrichtung ist robust gegenüber externen Schwingungen. Dies ist einer der größten Vorteile von neigungsmessenden Verfahren gegenüber Verfahren, die direkt die Höhe bzw. Abstand messen, wie z.B. Interferometer oder elektrische Sensoren. Da bei neigungsmessenden Verfahren die Höhe erst in einem zweiten

Schritt (Integration) berechnet wird, ist man unabhängig von konstanten, zeitlichen Höhenänderungen (z.B. Vibrationen oder Erschütterungen).

Bezugszeichenliste

1: Lichtquelle

2: Kondensor

3: Mustergenerator

4: Linse

5: Beleuchtungsblende

6: Projektionslinse

7: Ebene in der das Muster abgebildet wird

8: zu untersuchendes Medium / Oberfläche

9: Linse

10: Abbildungsblende

11: Linse

12: Detektoreinheit

13: Auswerteeinheit

14: Strahlteiler

15: Beleuchtungseinheit

16: Beleuchtungsstrahlengang

17: Abbildungsstrahlengang

18: abgelenkter Strahl

Patentansprüche

1. Verfahren zur ortsaufgelösten Bestimmung der Ablenkung von Lichtstrahlen durch eine Objektstruktur oder ein Medium, bei dem ein Oberflächenbereich eines Objekts oder ein Bereich des Mediums mit wenigstens einem optischen Muster beleuchtet wird und an dem Oberflächenbereich reflektierte oder durch den Oberflächenbereich oder den Bereich des Mediums hindurchgetretene Beleuchtungsstrahlen mit einem ortsauflösenden optischen Detektor erfasst werden, wobei
   - bei der Beleuchtung des Oberflächenbereichs oder des Bereichs des Mediums das für die Beleuchtung eingesetzte optische Muster in eine Ebene scharf abgebildet wird, die in Beleuchtungsrichtung in einem Abstand vor oder hinter dem Oberflächenbereich oder dem Bereich des Mediums liegt,
   - bei der Erfassung der Beleuchtungsstrahlen mit dem optischen Detektor der Oberflächenbereich des Objekts oder ein anderer interessierender Bereich des Objekts oder der Bereich des Mediums mit einer optischen Anordnung scharf auf den optischen Detektor abgebildet wird,
   - mit einem zwischen dem Objekt oder Medium und dem Detektor angeordneten optischen Element die numerische Apertur der Abbildung so eingestellt wird, dass sie kleiner oder gleich der numerischen Apertur der Beleuchtung ist, mit der der Oberflächenbereich des Objekts oder der Bereich des Mediums beleuchtet wird, und
   - aus einer Veränderung des mit dem Detektor erfassten optischen Musters die Ablenkung der Beleuchtungsstrahlen ortaufgelöst bestimmt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1,
   bei dem die numerische Apertur der Beleuchtung über eine optische Blende eingestellt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
   dadurch gekennzeichnet,
   dass das optische Muster mit einem Mustergenerator erzeugt wird, der entweder selbstleuchtend ausgebildet ist oder Licht einer Lichtquelle in Transmission oder Reflexion moduliert.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,
   dadurch gekennzeichnet,

dass vor oder nach der Erfassung des optischen Musters mit dem Detektor der Oberflächenbereich des Objekts oder der Bereich des Mediums ohne das optische Muster beleuchtet wird, um mit dem Detektor ein Schlieren-Bild zu erfassen.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, zur Bestimmung der Oberflächentopographie von Halbleiterscheiben.

6. Vorrichtung zur ortsaufgelösten Bestimmung der Ablenkung von Lichtstrahlen durch eine Objektstruktur oder ein Medium, mit
- einem optischen Mustergenerator, mit dem ein Oberflächenbereich eines Objekts oder ein Bereich des Mediums mit wenigstens einem optischen Muster beleuchtbar ist,
- einem ortsauflösenden optischen Detektor, der so angeordnet ist, dass er an dem Oberflächenbereich des Objekts reflektierte oder durch den Oberflächenbereich oder den Bereich des Mediums hindurchgetretene Beleuchtungsstrahlen erfasst,
- einer ersten Abbildungsoptik, mit der das optische Muster des Mustergenerators in eine Ebene scharf abgebildet wird, die in Beleuchtungsrichtung in einem Abstand vor oder hinter dem Oberflächenbereich oder dem Bereich des Mediums liegt,
- einer zweiten Abbildungsoptik, mit der der Oberflächenbereich des Objekts oder ein anderer interessierender Bereich des Objekts oder der Bereich des Mediums scharf auf den optischen Detektor abgebildet wird und die zwischen dem Objekt oder Medium und dem Detektor ein optisches Element beinhaltet, durch das die numerische Apertur der Abbildung auf den optischen Detektor so einstellbar ist, dass sie kleiner oder gleich der numerischen Apertur der Beleuchtung ist, mit der der Oberflächenbereich des Objekts oder der Bereich des Mediums beleuchtet wird.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, bei der die erste Abbildungsoptik zwischen dem Mustergenerator und dem Objekt oder Medium so ausgebildet ist, dass damit die numerische Apertur der Beleuchtung einstellbar ist.

8. Vorrichtung nach Anspruch 6 oder 7, bei der eine Lichtquelle zur Beleuchtung des Mustergenerators angeordnet und der Mustergenerator so ausgebildet ist, dass er das Licht der Lichtquelle in Transmission oder Reflexion zur Erzeugung des Musters ortsabhängig

moduliert.

9. Vorrichtung nach Anspruch 6 oder 7,
bei der der Mustergenerator selbstleuchtend ausgebildet ist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 8,
bei der das optische Element zur Einstellung der numerischen Apertur der Abbildung in einer Ebene angeordnet ist, in die die Lichtquelle durch optische Komponenten der ersten und zweiten Abbildungsoptik abgebildet wird.

11. Vorrichtung nach Anspruch 9,
bei der das optische Element zur Einstellung der numerischen Apertur der Abbildung in einer Ebene angeordnet ist, in der durch optische Komponenten der ersten und zweiten Abbildungsoptik ein Abbild einer durch den selbstleuchtenden Mustergenerator hervorgerufenen virtuellen Lichtquelle entsteht.

12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 11,
bei der der optische Detektor entlang der optischen Achse der zweiten Abbildungsoptik verstellbar gelagert ist.

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 12,
bei der die zweite Abbildungsoptik zur Verschiebung der Objektebene der Abbildung verstellbar ausgebildet ist.

14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 13,
bei der der Mustergenerator entlang der optischen Achse der ersten Abbildungsoptik verstellbar gelagert ist, um die Ebene, in der das Muster abgebildet wird, zu verändern.

15. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 14,
bei der die erste Abbildungsoptik zum Verändern der Ebene, in der das Muster abgebildet wird, verstellbar ausgebildet ist.

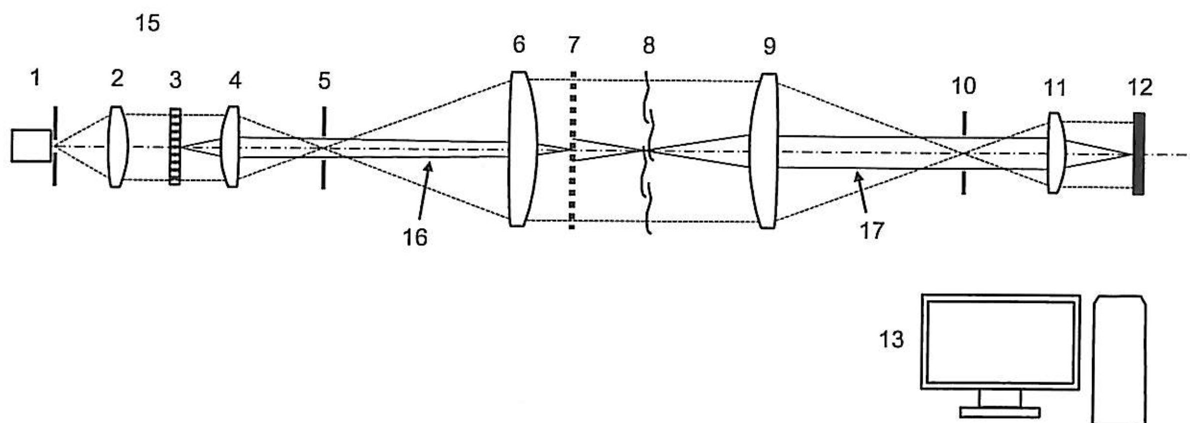
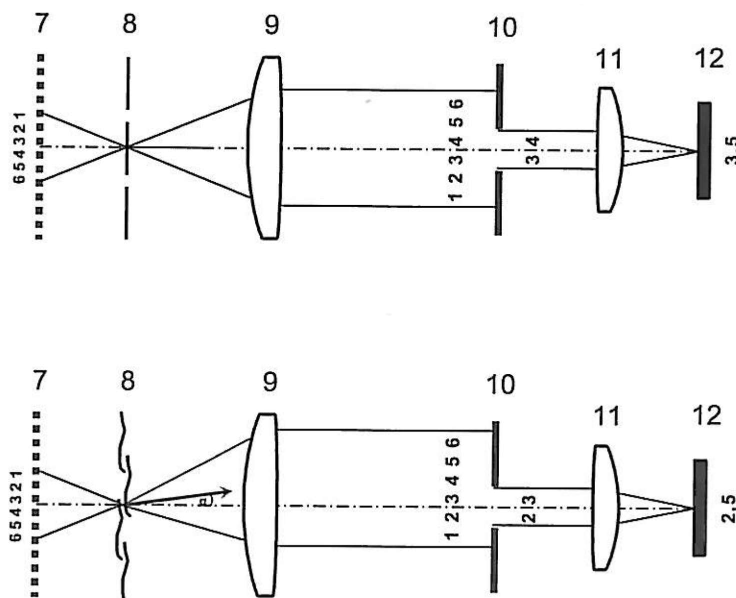


Fig. 1: Schematische Darstellung des Aufbaus zur Messung eines Objekts in Transmission

a)



b)

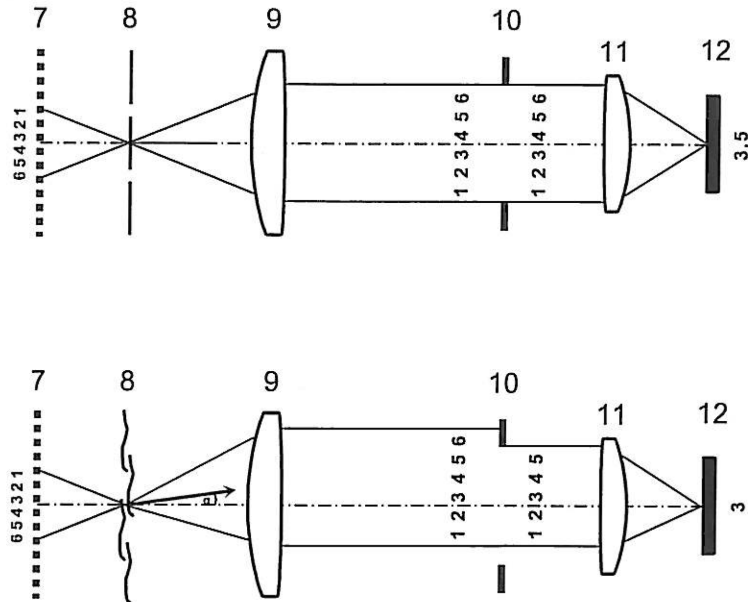


Fig. 2: Bildgebung und Signalentstehung; a) Konfiguration mit größerer Apertur der Beleuchtung als der Apertur der Abbildung; eine Ablenkung eines Lichtstrahls um den Winkel α kann durch eine Phasenverschiebung detektiert werden; b) Konfiguration mit Beleuchtungsapertur = Abbildungsapertur; bei einer Ablenkung eines Lichtstrahls um den Winkel α ergibt sich zusätzlich zur Phasenverschiebung eine Intensitätsänderung. Die Phasenverschiebung ist geringer als in a) (geringere Sensitivität)

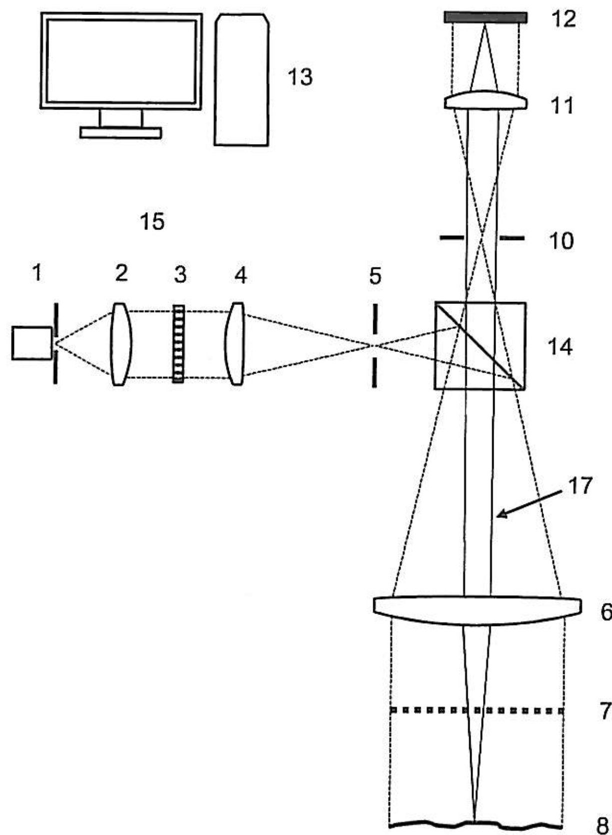


Fig. 3: Schematische Darstellung des Aufbaus zur Messung eines Objekts in Reflexion

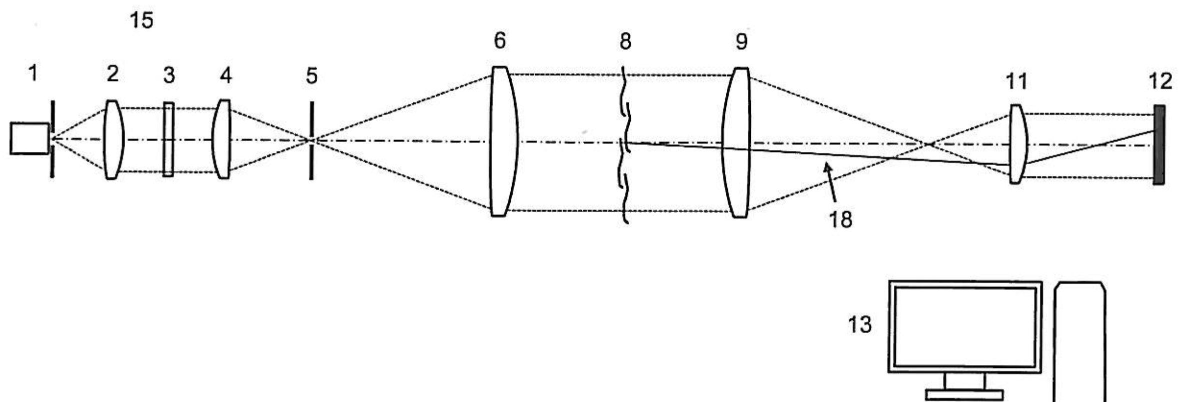


Fig. 4: Schematische Darstellung der Konfiguration zur Aufnahme eines Shadowgrams (beim Verfahren in Reflexion bekannt als „Makoyh"-Bild). Der Mustergenerator ist nicht vorhanden oder generiert eine homogene Intensitätsverteilung. Die Beleuchtungsapertur wird beliebig klein gewählt, um eine näherungsweise kollimierte Beleuchtung des Mediums zu erreichen. Eine Schlierenblende ist nicht vorhanden bzw. muss hinreichend groß gewählt sein. Die Detektoreinheit befindet sich außerhalb des Fokus, ist also auf eine Ebene in einem Abstand zur Ebene des zu untersuchenden Objekts fokussiert.